

ZÁRÓJELENTÉS

*Az OTKA T037548. sz. pályázathoz, melynek címe
„A galaxisok kialakulásának asztrofizikája és kozmológiája“*

Kitűzött célok

Pályázati munkánk kezdetekor azt tűztük ki célul, hogy az ELTE Atomfizika Tanszékén dolgozó kutatók (Csótó Attila, Frei Zsolt és Tóth Gábor) elméleti asztrofizikai kutatásaiból egységes kutatási programot hozzunk létre, hosszú évekre meghatározva a Fizikai Intézetben belül az asztrofizikai alap kutatás irányát. A kutatásba bekapcsoltuk a csoporttal hosszú ideje kapcsolatot tartó, az együttműködésben érdekelt Haiman Zoltánt (Columbia University), és az Intézet egy másik tanszékén asztrofizikai kutatásokat is végző Csabai Istvánt, ill. a vele dolgozó doktoranduszokat, akik az általunk szervezett szakirányú képzést elvégezve, többek között ebbe a programba bekapcsolódva kezdték aktív kutatói pályafutásukat.

Az elmúlt évek felfedezéseivel a mai kozmológiai kutatás hangsúlya áthelyeződött a kvalitatívra a kvantitatívra, más néven a precíziós kozmológiára: ma a cél az alapvető kozmológiai paraméterek minél pontosabb meghatározása. Hiába pontosak azonban a mérések, a mai kozmológia egyik még kvalitatívan sem megoldott kérdése a különböző asztrofizikai struktúrák (csillagok, galaxisok, galaxis-csoportok és kvazárok) létrejötte. Úgy gondoljuk, hogy néhány év múlva, amikor rendelkezésünkre fognak állni a kozmológiai paraméterek meghatározását szolgáló adatok, akkor a kozmológia legfontosabb kutatási témája lesz a különböző kozmikus struktúrák asztrofizikája. Ezen a területen belül jelenleg számos kérdés megoldatlan, viszont kutatócsoportunk tagjai éppen ezeknek a kérdéseknek a megválaszolásában jártasak.

Olyan vizsgálatokat is terveztünk, amelyek segíthetik a Nap-neutrínó-fluxusok pontosabb behatárolását, és ezáltal a neutrínók paramétereinek (tömegek, keveredési szögek) jobb megértését. A kozmológiai paraméterek mérésének egyre népszerűbb módszere azt feltárni, hogy hogyan függ a távoli szupernovák fényessége a tőlünk mért távolságuktól. Ezt a mérést befolyásolhatják a szupernovák fluxusát a távolsággal arányos mértékben szisztematikusan módosító effektusok, pl. a galaxisokban lévő, vagy az azokból a galaxisok közötti térbe kiáramló csillagpor. Csótó Attila korábban kifejlesztett programjával a nukleoszintézis csillagokban is kalkulálható. Tóth Gábor MHD programja alkalmas a nehéz elemek térbeli mozgásának modellezésére, így pl. a por galaxisokból való kiáramlásának vizsgálatára. Ezeket a korábbi eredményeket ötvözve meghatározható az Ia típusú szupernovák mért fényességének hibája.

Szinte minden kozmológiai vizsgálathoz szükséges a galaxisok távolsága, ami többnyire a vöröseltolódáson keresztül áll rendelkezésre. Többekkel együtt Csabai István és Budavári Tamás dolgozták ki azt a módszert, amellyel fotometriai adatokból képesek vagyunk a vöröseltolódás becslésére. Ha a morfológia alapján a galaxis típusa is ismert, akkor a vöröseltolódás pontosabban meghatározható. A galaxisok morfológiai osztályozása így

kiváló lehetőséget nyújt a fotometrikus vöröseltolódás-bebecslések pontosítására.

Most, a munka végeztével megállapítható, hogy a célok nagyrészen teljesültek, sőt, a kutatási idő során felmerülő újabb, a témához kapcsolódó problémák megoldásába is belekezdünk, és néhány területen publikációkat is közöltünk már. Ennek alátámasztására alább összegezzük a munka *végrehajtásának körülményeit*, a *nemzetközi együttműködések*et, a munka során megvalósított *utánpótlás-nevelést*, a *publikációs tevékenységet*, és végül részletesen az *elért eredményeket*.

Pénzügyi feltételek

Munkánk eredetileg 3 évre lett tervezve. Ennek második évében elfogadtuk az ún. „Draskovics-csomag” következtében szükségessé vált költségvetési elvonást. Olymértékben takarékoskodtunk, hogy lehetővé vált a megspórolt összegből a program kiterjesztése a negyedik évre. Ehhez a szükséges engedélyt megkaptuk. A sok pénzügyi változtatás adminisztratív bonyodalmakat okozott, így a zárójelentést jelentős késéssel tudjuk csak lezárni.

Nemzetközi együttműködés

Pályázatunk részese volt Haiman Zoltán, aki a new yorki Columbia Egyetem munkatársa. Magától értetődő, hogy nemzetközi együttműködésben kívántuk a programot megvalósítani, és ez sikerült is.

Haiman Zoltán és Frei Zsolt több diplomamunkás hallgatóval és doktorandusszal együtt, közösen dolgozott. Ennek keretében 3 diák jelentősebb időt (hónapok) töltött külföldön. A Columbia Egyetemen ma már nemcsak Haiman Zoltán, de egy másik magyar származású professzor, Márka Szabolcs is állandó kollaborátorunk lett. A galaxisok kialakulásának tanulmányozása nemsokára már gravitációs hullámok segítségével is lehetővé válik. Munkánk során ezt az új lehetőséget felismerve olyan kollaborációba kezdtünk, amelynek eredménye több, a témába tartozó cikk (olyanok is, amelyek nem részei ennek a pályázatnak, és így itt nem lettek felsorolva). Újabb, közös pályázattal jelentős támogatást kaptunk a munka folytatására.

A 6. Keretprogram során az EU egyetlen asztrofizika témájú Marie Curie RTN programot támogatott, és ennek mi is részesei lettünk. Csabai István a „Multiwavelength Analysis of Galaxy Populations” (MAGPop) program helyi koordinátora. Mint a neve is mutatja, a program célja nagyon hasonló a most lezárt pályázat céljához, ezért abban többen aktív szerepet tudunk vállalni.

A futamidő alatt hazánk csatlakozott a készülő európai gravitációshullám-detektor, a VIRGO tudományos fórumához. A magyarországi koordinátor Rácz István (RMKI), az ELTE koordinátora pedig Frei Zsolt lett.

Az itt leírt, a tervezettnél szélesebb körű nemzetközi együttműködések abban is segítenek, hogy az itthoni kutatók munkáját jobban integráljuk. Haiman és Frei közös projektjeik révén, Csabai és Frei a MAGPop és a Virtual Observatory (lásd alább) révén, az RMKI és az ELTE kutatói a VIRGO együttműködés révén folytatnak közös kutatásokat. Mindezeket túl azon, amit a jelen pályázat egyébként is szükségessé és lehetővé tett.

Utánpótlásnevelés

Frei Zsolt 5 diplomamunkát vezetett sikerrel a pályázathoz kapcsolódva: Lippai Zoltán, Kocsis Bence, Gáspár Merse, Raffai Péter és Juhász Péter diplomáztak az ELTE-n témavezetésével. Közülük Lippai, Kocsis és Raffai jelenleg ugyancsak az ELTE-n doktoranduszok Frei vezetésével. Tóth Gábornak két diplomamunkása volt: Kovács Dániel és Monostori Gábor. Csabai István diplomamunkásaként végzett Koronczay Dávid. Egyéb támogatásból (EU) a témához kapcsolódva külföldi doktorandusz is érkezett hozzánk (Vince Olivér, magyar származású, Szerbiából).

A pályázat futamideje alatt Frei Zsolt és Patkós András megjelentette a kozmológia tárgyát lefedő első magyar nyelvű tankönyvet is.

Publikációs tevékenység

A csatolt publikációs listában 24 publikáció szerepel. Nagyon komolyan vettük a zárójelentés elkészítéséhez adott útmutatót, és valóban csak az adott eredmény közlésének leghatékonyabb formáját (cikk) soroltuk fel, konferencia-publikációkat, illetve mást nem. Így a 24 felsorolt publikációból 21 angol nyelvű referált folyóiratban megjelent cikk, csak kettő konferencia-kiadvány, illetve egy könyv. A futamidő alatt készített publikációk közül csak azokra írtuk fel az OTKA számot (így csak azok szerepelnek itt), amelyek valóban a témához köthetők. Így Frei és Tóth több, a futamidő alatt készült munkája sincs itt felsorolva.

Cikkeink többek között az Astrophysical Journal-ban, a Nuclear Physics A-ban, a Journal of Geophysical Research-ben, az MNRAS-ban és a Phys Rev. D-ben jelentek meg. A fizetős folyóiratokban a publikációs költséget kifizettük, többnyire a külföldi partnerek kereteiből, de egyszer ennek a pályázatnak is a terhére.

Részletes tudományos eredmények

Frei Zsolt vezető kutató és munkatársaim, Lippai Zoltán diplomamunkás hallgató, ill. Haiman Zoltán jelentős eredményt értünk el a korai Univerzum szerkezetének modellezésében. Kifejlesztettünk egy ún. "merger tree" programot, amellyel a **nagyskálás szerkezet időbeli fejlődése**, az anyag-sűrűsödések időbeli növekedése az eddigieknél jobban modellezhető. A program képes arra, hogy akár $z=15$ vöröseltolódásnál is leírja a csomósodások eloszlását (massfunction, ill. luminosity-function). Ezzel meghatározható pl. a kvazárok luminozitásfüggvénye olyan nagy vöröseltolódásokon, amelyek egyelőre nem, csak majd a New Generation Space Telescope segítségével tanulmányozhatók.

Kocsis Bence doktorandusszal közösen elvégeztük a **Sunyaev-Zel'dovich effektuson** alapuló, a galaxishalmazokban várt lökéshullámok kimutathatóságának vizsgálatát. A galaxisok kialakulásának és fejlődésének vizsgálatához szükséges a galaxishalmazok megfigyelésekkel való nyomonkövetése, a bennük található teljes anyagmennyiség kimutatása. Mivel a galaxis-térképek csak az anyageloszlás azon „csúcsait” mutatják ki, ahol az anyag sűrűsége elegendően nagy volt a galaxisok kialakulásához, ezért így nem érzékelik a kevésbé sűrű, de számottevő gázkomponenst.

A teljes tömeg kimutatása a halmazok Röntgensugárzása, vagy a Sunyaev-Zel'dovich effektus segítségével lehetséges, hiszen ezek a mérések a teljes anyagtömegre érzékenyek. Munkánk során azt mutattuk meg, hogy kellően érzékeny és kellően nagyfelbontású

detektorok (ilyenek épülnek jelenleg) segítségével a klaszterek mérete is észlelhető, mert a szélükön várt lökéshullám elegendően erős jelet ad majd a képeken. Az erről szóló cikket az Astrophysical Journal közölte.

A galaxisok a fejlődésük során egymással ütköznek és összeolvadnak. A galaxisfejlődés szempontjából fontos folyamat (összeolvadás) a gravitációs hullámok segítségével detektálható. Kocsis Bence doktorandusszal kiszámoltuk, hogy a galaxisok összeolvadásakor a magban található fekete lyukak összeolvadása olyan gravitációs hullámot kelt, amelyet a most működésbe álló detektorok képesek érzékelni. Megbecsültük, hogy az **összeolvadó magok optikai megfelelője** is megtalálható a gravitációs hullámok detektálása nyomán, mert a hullám-detektorok kellően pontosan megadják, hogy milyen távolságból és milyen irányból érkezett a hullám. Az erről szóló cikket is az Astrophysical Journal közölte.

Ezt a munkát tovább folytatva igen nagy nemzetközi visszhangot kiváltó eredményt értünk el. Legutóbbi cikkünk (megjelenés alatt, Phys. Rev. D) azt taglalja, hogy az összeolvadó fekete lyukak már **az összeolvadás előtt 7-10 nappal is kimutathatók**, mert az összeolvadás előtti utolsó stabil körpályán már olymértékű gravitációs hullámokat keltenek, hogy azt tervbe vett gravitációs űr-obszervatórium, a LISA már képes lesz kimutatni. Így az optikai megfelelője ennek az eseménynek nemcsak az esemény után kis idővel lesz megfigyelhető, hanem előrejelzésünk alapján az egész folyamat észlelhető lesz. A LISA tervezői a cikkünkben foglalt eredményeket bevették az ún. „design requirement”-ek közé (azaz úgy kell a műszert megépíteni, hogy ez az előrejelzés lehetséges legyen), és a készülő Large Synoptic Survey Telescope (LSST) vezetői is olyan nagy jelentőségűnek tartják ezt a megfigyelési lehetőséget, hogy ezt beillesztették a megfigyelési stratégiába: ha megfelelő előrejelzést kapnak, akkor 3-100 másodpercenként fogják fényképezni az esemény várt helyét.

Csótó Attila az **időben változó finomszerkezeti állandó** hatását vizsgálta, különös tekintettel a nukleoszintézist befolyásoló tényezőkre. Távoli kvazárok fényének abszorpciós spektrumát tanulmányozva csillagászok azt találták, hogy a jelenlegi Standard Modell egyik alapvető fizikai állandója, a finomszerkezeti állandó (α) valójában nem állandó, hanem időben változik. A relatív változás mértéke -0.72×10^{-5} , a $0.5 < z < 3.5$ vöröseltolódási tartományban. Egy időben változó α jelentősen módosíthatja a korai nukleoszintézist.

Amint azt Csótó és munkatársai kimutatták, az erős kölcsönhatás részleteire (és így az α értékére) leginkább érzékeny folyamat a ^{12}C izotópot szintetizáló **három-alfa reakció**. Ezért a fentebb említett módon, a változó finomszerkezeti állandóból lezármaztatott módosított erős kölcsönhatási problémát megoldották a ^{12}C esetére. Kiszámították az ily módon megváltozott szén- és oxigén-termelő rátákat. **Meghatározták a kis-, közepes- és nagytömegű csillagokban termelődött szén és oxigén mennyiségét.** A hozamokat olyan modern csillagevolúciós szimulációkból nyerték, amelyek a nagytömegű csillagok teljes evolúcióját végigkövetik, beleértve a szupernovarobbanást is, illetve részletesen figyelembe veszik a könnyű és közbelső tömegű csillagok pulzáló aszimptotikus óriáság-állapotában bekövetkező feláramlási (dredge-up) folyamatokat. Eredményeik azt mutatják, hogy a nagytömegű csillagokban szén- és oxigéntermelés erősen függ a **kezdeti tömegtől**, és alapvető fontosságú a teljes evolúciós folyamat végigkövetése. Modellük szerint a kis- és közepes tömegű csillagokban **jelentős széntermelés zajlik** a héliumhéj-felvillanások időszakában. Ez a korábbi eredményeikhez képest, ahol csak nyugodt-fázisú héliumégés volt jelen, jelentősen csökkenti a szén- és oxigénhozamoknak a 3α -rátától való függését. Például úgy tűnik, hogy a közepes csillagokban széntermelés hozamának a ^{12}C -beli 0+2 állapot valódi helyénél **maximuma van**.

Eredményeiknek, amelyek megjelentek a Nuclear Physics A és az Astrophysics and Space Science folyóiratokban, számos alkalmazása lehetséges. A finomszerkezeti állandónak a közelmúltban megfigyelt kozmológiai léptékű változása azt eredményezi, hogy a ^{12}C atommag 0+2 energiaszintjének helye **időben változik**. Ez a fentiek szerinti izotóparány-eltolódáshoz vezet. Ennek eredményeként például módosulhattak a korai, fémekben szegény csillagok által létrehozott gázfelhők izotóparányai, illetve a kozmológiai távolságmérésben használt **Ia-típusú szupernovák** szén-oxigén törzse, és így fényessége.

Tóth Gábor különböző numerikus módszerek kidolgozásával és megvalósításával foglalkozott. Elkészült egy **szemirelativisztikus magnetohidrodinamikai program**. Az adaptív rácsokkal kapcsolatban és a numerikus magnetohidrodinamikával kapcsolatban 2-2 cikke jelent meg. Ugyancsak elkészült az általános célú magnetohidrodinamikai program, a **Versatile Advection Code** (VAC) 4.5-ös verziója, amely a Message Passing Interface (MPI) könyvtár segítségével is futtatható parallel számítógépeken. Így a VAC olyan sok processzoros gépeken is futtatható, ahol nincs High Performance Fortran fordító.

Tóth két diplomamunkás hallgatót is bekapcsolt a munkába. Kovács Dániel sikeresen modellezte az **Uránusz magnetoszféráját**, és az eredmények kitűnő egyezést mutatnak a Voyager II méréseivel. Az eredmény a Journal of Geophysical Research folyóiratban jelent meg. Monostori Gábor egy új programcsomagot írt, amely a magnetohidrodinamikai megoldás alapján rendkívül hatékonyan és pontosan számítja ki a kémiai összetételt az egyensúlyi reakcióegyenletek hatékony megoldásával. Az új **Chemistry Integrator** (CHI) program több nagyságrenddel gyorsabb és jóval sokoldalúbb mint az eredeti C program, amit a University of Michiganen használtak. Az új programcsomagról egy cikk készült, amit a Journal of Computational Physicsben publikáltak.

A University of Michigan kutatócsoportja az űridőjárás előrejelzéséhez létrehozta a **Space Weather Modeling Framework** (SWMF) szoftver keretprogramot. Az SWMF az első hatékony, párhuzamos futtatásra alkalmas framework az űrfizikában. Tóth Gábor az SWMF tervezésében és megvalósításában meghatározó szerepet töltött be. Az SWMF ma már kilenc fizikai modellt kapcsol össze. Mindegyik modell egy-egy tértartománynak felel meg. A modellek önmagukban is igen bonyolultak, összekapcsolásuk mind fizikai mind algoritmikus szempontból komoly feladatot jelentett. A három éves fejlesztés számos célkitűzést megvalósított. Az egyik ilyen mérföldkő az SWMF futtatása a valós időnél gyorsabban mind a kilenc modellel. Ez a feladat még a mai szuperszámítógépeken is komoly kihívást jelentett, de sikerült teljesíteni: egy SGI Altix gép 256 processzorán az SWMF majdnem kétszer gyorsabban futott mint a valós idő, azaz az SWMF előrejelzésre is alkalmas. Az SWMF-ről egy összefoglaló technikai cikk a Journal of Geophysical Research-ben jelent meg. Egy másik cikk a fizikai modellek párhuzamos futtatásáról a SIAM Journal of Computing-nál került publikálásra.

A galaxisok többfajta típusúak lehetnek. Magát ezt a típusba sorolást is többféleképpen lehet elvégezni: részben a spektroszkópiái, részben pedig a morfológiai tulajdonságok alapján. Ehhez jön hozzá egy harmadik módszer, ami a Csabai István és munkatársai (Győry Zsuzsa, Budavári Tamás) által művelt fotometriai vöröseltolódás módszeréhez kapcsolódik: **típusokba sorolás fotometria alapján**. Mivel eddig nem álltak rendelkezésre olyan nagy statisztikai minták, amelyek ezen osztályozások összehasonlíthatóak lettek volna, átfogó ilyen jellegű feltárást eddig nem végeztek. Csabaiék megtették az első lépést ebbe az irányba.

A Nemzetközi Virtuális Obszervatórium erőfeszítéseire csatlakozva két projektet valósítottak meg. A **Virtuális Obszervatórium** egyik prototípusa a SkyQuery (<http://www.skyquery.net>) lehetővé teszi, hogy a különböző csoportok által különböző hullámhossz tartományokban észlelt, akár különböző helyeken adatbázisok közösen kereshetőek legyenek. A fenti rendszer számára kereshetővé tették a FIRST, IRAS, 2dFGRS, 2QZ, NVSS, PSCz és 2MASS katalógusokat. Számos esetben szükség van arra, hogy ne a nyers adatokat használjuk fel, hanem bizonyos transzformációkat már az eredeti helyszínen elvégezzünk. Ez a mellett, hogy szükségtelenné teszi, hogy az adatok felhasználásához különböző konverter programokat kelljen telepíteni, jelentősen csökkentheti a hálózaton átvihető adatmennyiséget is. Létrehoztak egy olyan szolgáltatást, amely a SDSS és néhány más kisebb projekt spektrumain képes elvégezni olyan transzformációkat, mint például kompozit spektrumok készítése, különböző vöröseltolódások alkalmazása, optikai színszűrők alkalmazása, és különböző rendszerekben a magnitúdók kiszámolása. A szolgáltatás a <http://skyserver.elte.hu/spectrum/> oldalon érhető el.

Csabai felvette a kapcsolatot Stephane Charlot-val, aki az egyik legáltalánosabban elfogadott, az ún. Bruzual-Charlot spektrális szintézis modelleket fejleszti. Ennek egyik folyományaként sikeresen részt veszünk egy 2004-ben indult EU Marie Curie network-ben, ami a jelen pályázatban vállalt munka szerves kiegészítéseként **galaxis populációk analízisét** tűzte ki célul széles hullámhossztartománybeli adatok elemzésével. A Bruzual-Charlot kód aktuális verzióját telepítettük, sőt tovább is fejlesztettük. Ez a galaxis luminozitás-függvény felvételéhez és a galaxis evolúció vizsgálatához kiváló segédeszközként használható. Az SDSS „u” szűrőjére alapozott kiválasztás alapján összeállított katalógus ilyen értelmű vizsgálatából jelent meg egy cikkünk, melyben fotometrikus vöröseltolódás segítségével választottuk szét az alacsony és magas vöröseltolódású galaxis mintákat (SDSS kollaboráció, Budavári Tamás).

Budapest, 2007. január 12.

Dr. Frei Zsolt sk
egyetemi docens
(vezető kutató)